

8. Раздельная переработка проб руды Гусевогорского месторождения: отчет о НИР по х/д № 01/07/-12И / под рук. Пелевина А. Е. ООО «Техноген-проект», 2012. 20 с.

9. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V., Kornilkov S.V., Pelevin A.E., Fishma A.Ya., Sapozhnikova T.V., Shunyaev K.Yu.. The Characteristic of Ores and Concentrates of the Open Society "EVRAZ KGOK" // Advanced Materials Research. 2014. Vols. 834-836. Pp. 364-369.

УДК 669.045

**И. А. Прибытков, М. В. Ганина**

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет МИСиС», г. Москва, Россия

## **ПРЕДПРОЕКТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА АЗОТА**

Задача коренного улучшения качества и увеличения выпуска холоднокатаного стального листа является важнейшей в российской черной металлургии, направленной на обеспечение растущей потребности национальной экономики. Практически весь холоднокатаный лист в нашей стране производят рулонным способом и на завершающей стадии подвергают светлomu (в защитных средах) рекристаллизационному отжигу в термических печах. Оборудование, тепловой и температурный режимы и теплообменные процессы в этих печах решающим образом определяют качество готового листа, а также производительность и экономичность отжига.

Целью данной работы является разработка и исследование установки для проведения светлого рекристаллизационного отжига холоднокатаной стальной ленты с использованием струйного конвективного нагрева, позволяющего повысить энергоэффективность технологического процесса. Отличительной особенностью такой установки является использование азота одновременно как теплоносителя, так и защитной атмосферы. Для достижения поставленной цели необходимо решить, как минимум, две задачи: первая – разработка устройства для нагрева азота, вторая – разработка собственно устройства для нагрева стальной ленты. Работа посвящена разработке и исследованию устройства для нагрева азота.

### **Общая схема комплекса «устройство для нагрева азота – устройство для нагрева стальной ленты»**

Разработанная принципиальная схема комплекса «устройство для нагрева азота – устройство для нагрева стальной ленты» представлена на рис. 1.

В устройстве 1 производится нагрев теплоносителя (азота) теплотой продуктов сгорания топлива. Подогретый до заданной температуры азот транспортируется по трубопроводу и в виде системы струй подается в устройство для нагрева стальной ленты 2, где одновременно выполняет функции теплоносителя и защитной атмосферы.

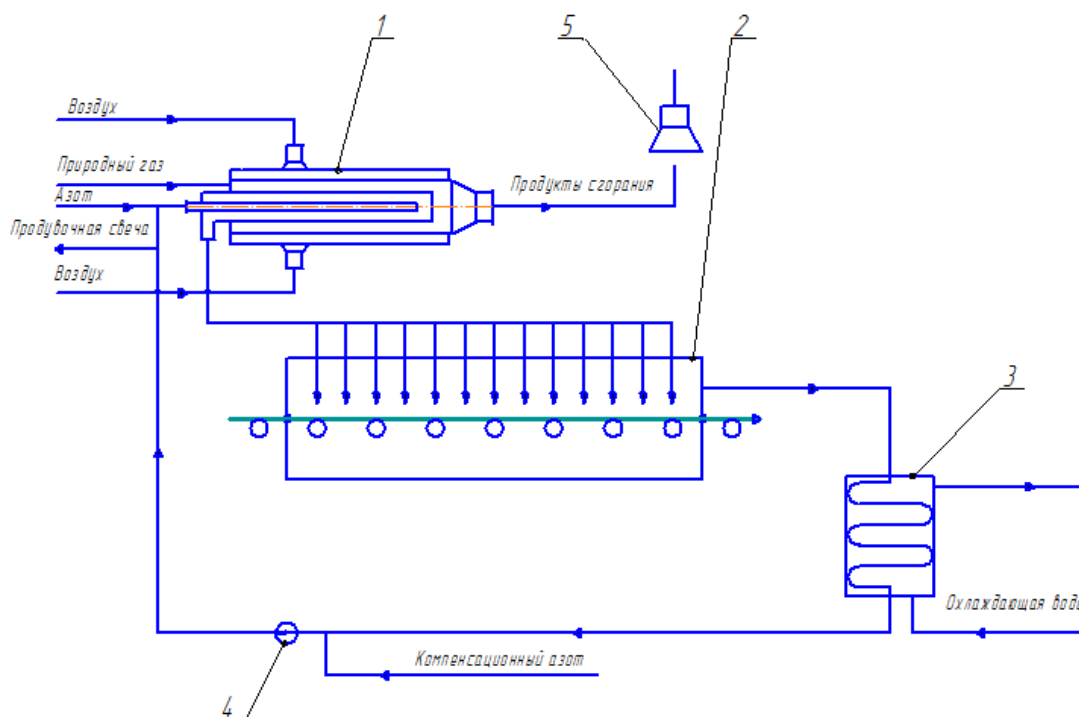


Рис. 1. Принципиальная схема комплекса «устройство для нагрева азота – устройство для нагрева стальной ленты»:

1 – устройство для нагрева азота; 2 – устройство для нагрева стальной ленты;  
3 – охладитель азота; 4 – дутьевой вентилятор; 5 – вытяжной зонт

Побудителем движения азота является дутьевой вентилятор. Для обеспечения его надежной работы азот охлаждается до температуры  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  в охладителе азота 3. Контур движения азота замкнут, что позволяет сократить расход защитной атмосферы. Для восполнения утечек предусмотрена линия компенсационного азота.

Продукты сгорания топлива улавливаются вытяжным зонтом, который рассчитывается таким образом, чтобы подсасываемый воздух разбавлял дым до  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это необходимо для обеспечения устойчивой работы дымососа.

Устройство для нагрева стальной ленты предназначено для проведения процесса светлого рекристаллизационного отжига.

Для исключения попадания кислорода (воздуха) вместе с входящей лентой устроен механический затвор из отжимных роликов.

Устройство работает следующим образом. Лента входит через отверстие и, двигаясь по поддерживающим роликам, нагревается струями нагретого азота. Конвективная составляющая теплообмена велика. Производится непрерывный контроль температуры ленты пирометром.

Разработанный комплекс обладает рядом преимуществ по сравнению с колпаковой печью:

- интенсификация теплообмена, что приводит к сокращению времени нагрева металла;
- уменьшение габаритов;
- снижение капитальных затрат на строительство;
- малая тепловая инерционность;

- относительная простота системы контроля и автоматизации;
- соответствует требованиям поточного производства.

### Конструкция и принцип работы устройства для нагрева азота

В разработанном устройстве для нагрева азота используется принцип струйного конвективного теплообмена.

Предлагаемое устройство для нагрева азота содержит цилиндрический корпус, установленные concentricно ему цилиндрическую трубу для сгорания топлива и 2 промежуточных трубы с распределенными по их поверхности отверстиями.

Устройство снабжено патрубками подвода газа, воздуха, холодного азота и отвода дыма, нагретого азота.

Выходной конец патрубка подвода газа подсоединен к газовой камере. Патрубок подвода воздуха смонтирован на корпусе со стороны входа в рабочую камеру, его выходной конец сообщен с полостью, образованной стенкой корпуса и промежуточной трубой. В трубе для сгорания топлива установлены запальники и электрод.

Схема устройства представлена на рис. 2.

Устройство работает следующим образом.

Воздух подводится через патрубок в трубу для подачи воздуха и далее подается через отверстия перпендикулярно поверхности трубы для сгорания топлива в виде системы струй. Газ через газораспределительное устройство подается в трубу для сгорания топлива. Газовоздушная смесь воспламеняется запальником.

Азот подается в виде системы струй через отверстия и нагревается за счет теплоты стенки трубы, разделяющей продукты сгорания и азот.

Общий вид устройства представлен на рис. 3.

В работе был проведен расчет диаметров труб устройства, по результатам которого были выбраны диаметры и толщины стенок из существующего сортамента.

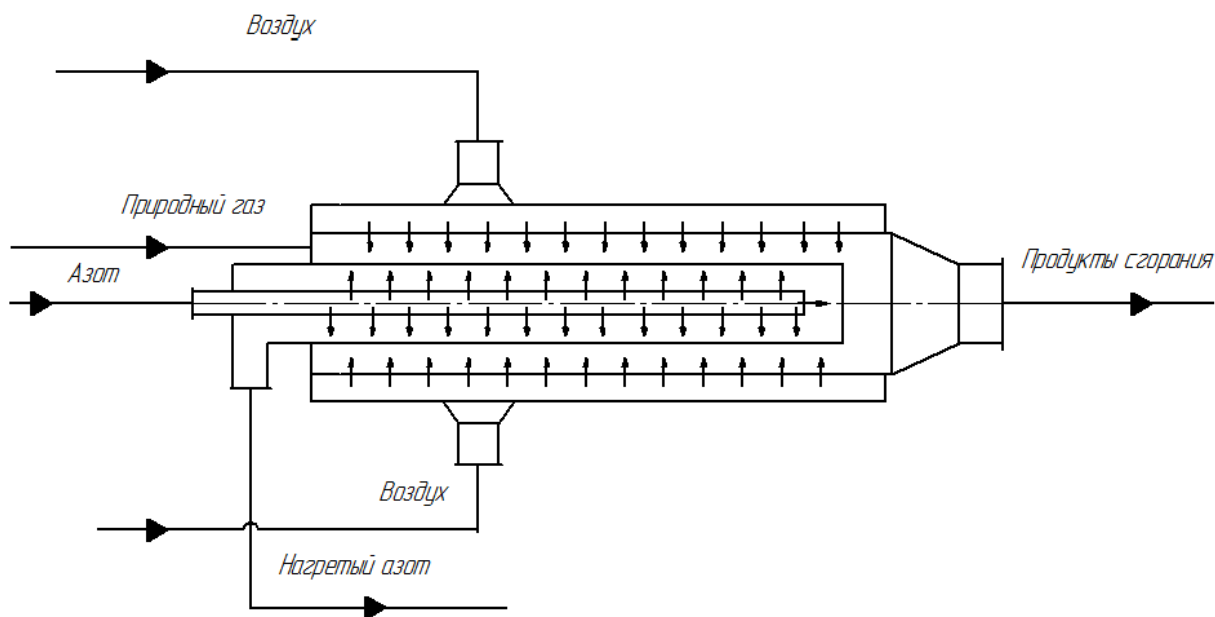


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для нагрева азота

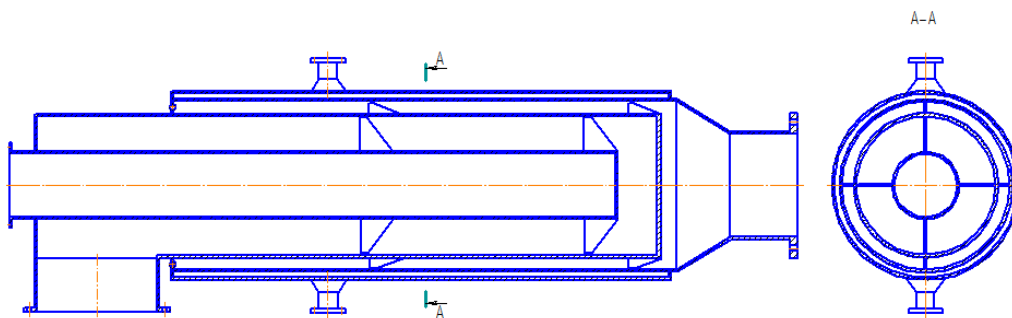


Рис. 3. Общий вид устройства для нагрева азота

Таблица 1

Диаметры и толщина стенки труб

Виды труб	Рассчитанный диаметр, мм	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм
Труба для подачи азота	112,4	121	113	4
Труба для нагрева азота	267,5	273	260	6,5
Труба для сгорания топлива	329	325	310	7,5
Труба для подачи воздуха	335	351	335	8

### Расчет температуры стенки трубы, разделяющей продукты сгорания топлива и нагретый азот

Плотность теплового потока продуктов сгорания определяется:

$$q_1 = \alpha_1 (T_1 - T_{cm}), \quad (1)$$

где  $q_1$  – плотность теплового потока продуктов сгорания, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи продуктов сгорания, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$T_1$  – температура продуктов сгорания (задается в интервале 900–1600), °С;

$T_{cm}$  – температура стенки, °С.

Плотность теплового потока азота определяется:

$$q_2 = \alpha_2 (T_{cm} - T_2), \quad (2)$$

где  $q_2$  – плотность теплового потока азота, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи азота, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$T_2$  – температура азота, °С (при пуске устройства  $T_2 = 20$  °С, при эксплуатации  $T_2$  изменяется в интервале 20–500 °С).

В условиях стационарной теплопроводности тепловые потоки равны.

$$q_1 = q_2.$$

Приравняв уравнения (1) и (2):

$$\alpha_1 (T_1 - T_{cm}) = \alpha_2 (T_{cm} - T_2).$$

Принимается  $\alpha_1 = \alpha_2$ , тогда:

$$T_{cm} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (3)$$

График зависимости температуры стенки от начальной температуры азота при различных температурах продуктов сгорания при  $\alpha_1 = \alpha_2$  представлен на рис. 4.

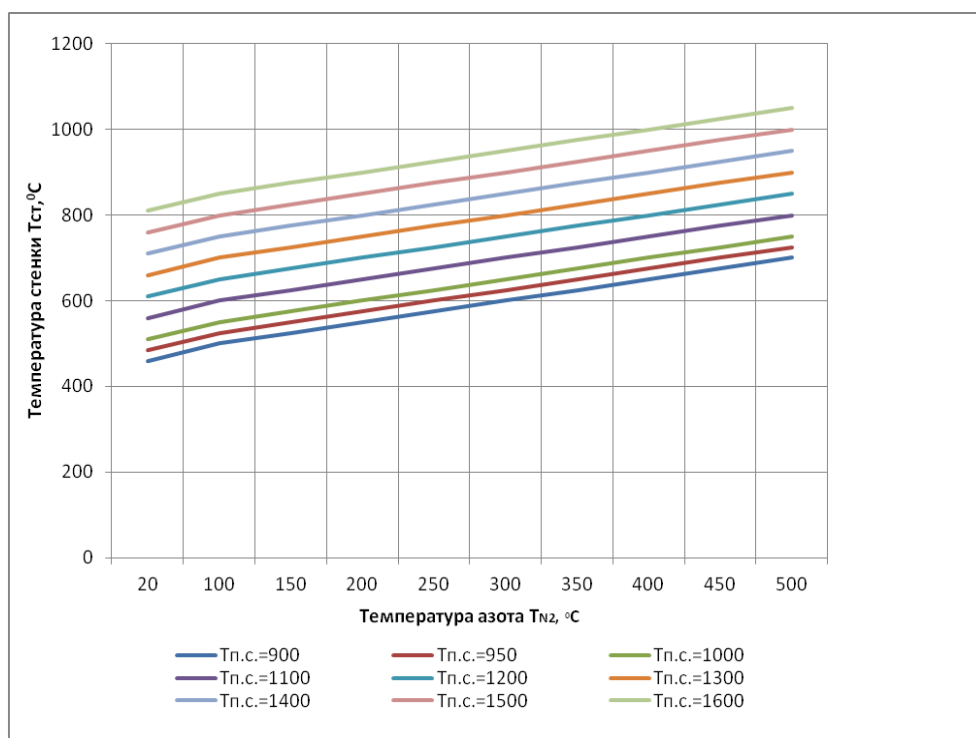


Рис. 4. График зависимости температуры стенки от температуры подогрева азота при различных температурах продуктов сгорания

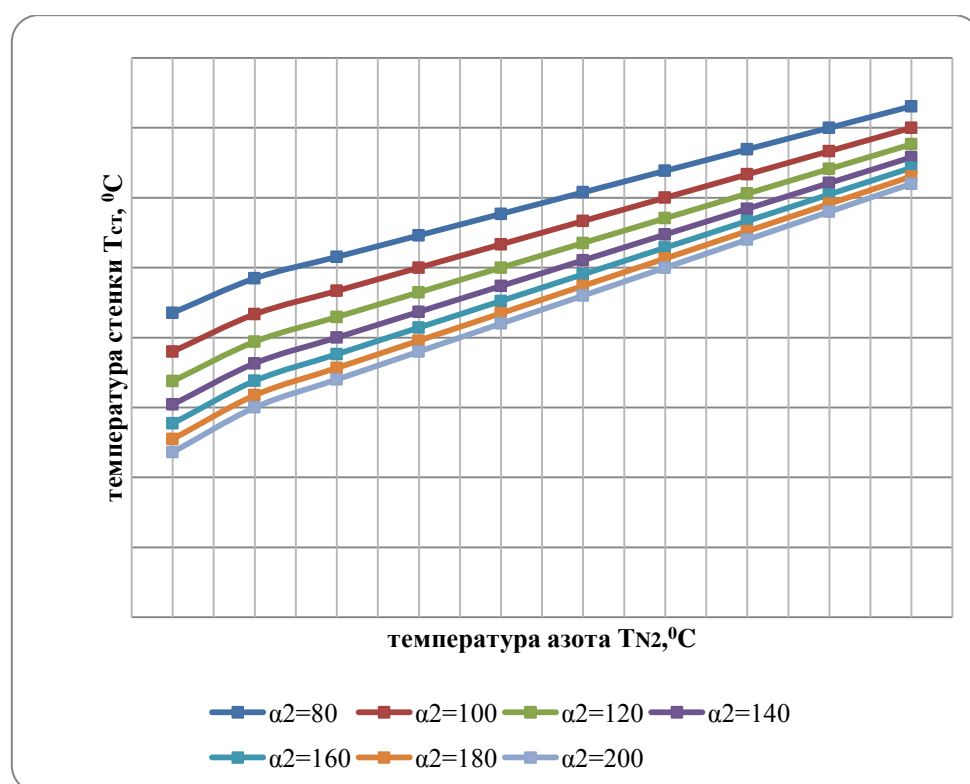


Рис. 5. График зависимости температуры стенки от начальной температуры азота при  $\alpha_1 = 50 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  и различных значениях  $\alpha_2$

По существу данное устройство представляет собой систему экранного типа, в которой процессы переноса теплоты излучения дополняются процессами конвективной теплоотдачи. При этом имеется одна зона генерации теплоты, в которой топливо сжигается при струйном истечении воздуха и канальном течении топлива. Струи истекающего воздуха на начальном этапе взаимодействуют с потоком топлива. По мере удаления от места ввода топлива процессы смешения и горения топлива усложняются, поскольку имеет место взаимодействие струй воздуха уже со смесью топлива и продуктов его частичного сгорания. Существование такого сложного взаимодействия трех газообразных агентов приводит к специфическому формированию температурного поля по длине рабочей камеры устройства для нагрева азота. Такой процесс требует дополнительного экспериментального исследования.

Кроме зоны генерации теплоты имеются зоны теплообмена, в которых выделенная при сжигании топлива теплота используется для подогрева азота, подогрева воздуха горения и охлаждения элементов конструкции.

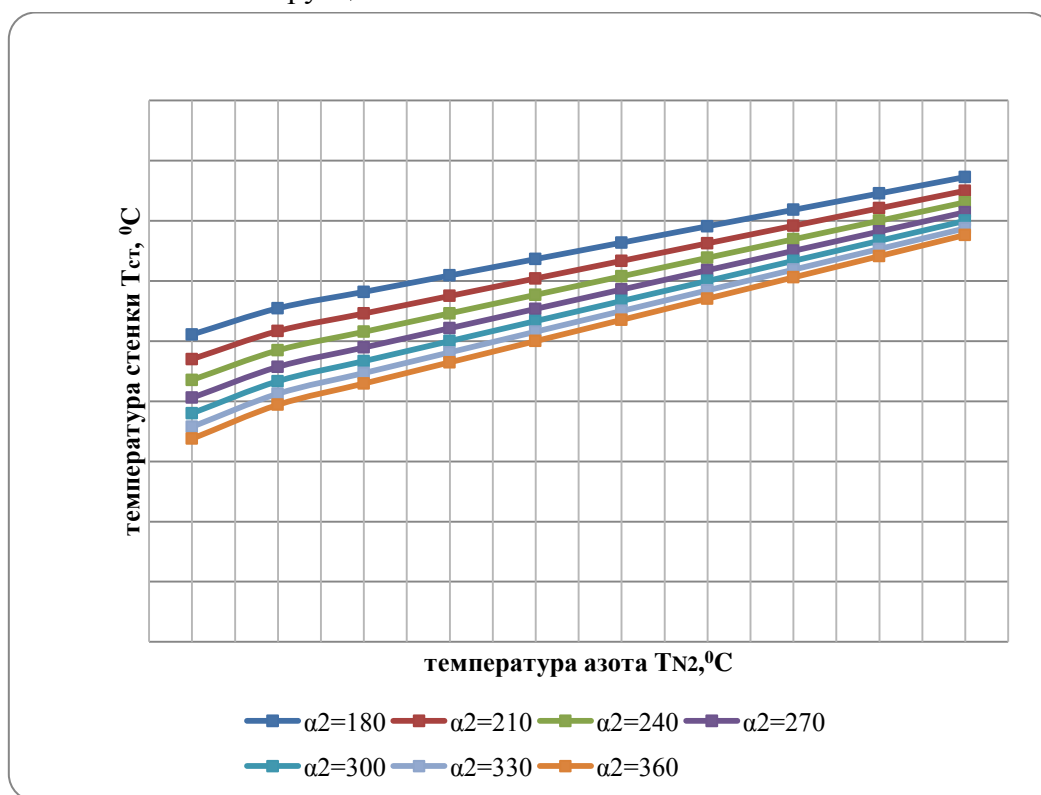


Рис. 6. График зависимости температуры стенки от начальной температуры азота при  $\alpha_1=150 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  и различных значениях  $\alpha_2$

В самом общем виде процессы теплообмена можно описать известной системой уравнений (схема показана на рис. 7).

Решение данной системы уравнений требует знания теплофизических свойств материала труб, оптических характеристик их поверхностей, конструктивных размеров устройства, величины коэффициентов конвективной теплоотдачи при соответствующих режимах течения газообразных компонентов. Основной целью решения приведенной системы уравнений является определение температуры конструктивных элементов проектируемого устройства для подогрева азота.

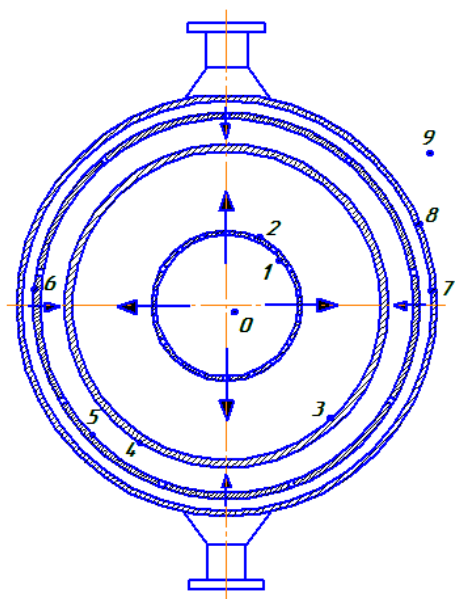


Рис. 7. Схема процессов теплообмена

Организация струйного истечения нагреваемого азота и воздуха на горение топлива преследует следующие цели:

- интенсификация процессов конвективного теплообмена воздушного и азотного потоков с поверхностью теплообмена;
- охлаждение элементов конструкции устройства;
- улучшение перемешивания воздуха и топлива;
- уменьшение габаритных размеров и, как следствие, снижение затрат на изготовление устройства.

УДК 669.09

**Г. А. Родионов, В. В. Бухмиров**

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ ПНЕВМОТРАНСПОРТА С КАМЕРНЫМИ НАСОСАМИ

### Аннотация

*В настоящее время существует проблема высокой энергоемкости функционирования систем пневмотранспорта сыпучих материалов. Предложена математическая модель движения двухфазных потоков мелкодисперсных материалов с учетом взаимодействия частиц, неравномерности заполнения материалопровода и турбулентности потока. Математическая модель может быть использована для расчетов движения двухфазных потоков как в трубопроводах, так и в пневмокамерных насосах, при условии учета геометрических особенностей конструкции и свойств твердого материала в неподвижном состоянии. Вы-*